

Bluetooth® Low Energy による位置検出実現と品質担保のための測定

後藤 剛秀 Yoshihide Goto, 熊木 成央 Akihisa Kumaki, 中野 隆史 Takashi Nakano

[要 旨]

ヘッドフォンなどのワイヤレス化を支える Bluetooth®テクノロジーは、データ転送だけでなく位置推定や距離検出などの新たな手段として展開し、1998 年の規格制定から 20 年あまり経過した現在でもなお利用分野は広がりを見せている。アンリツは、MT8852B Bluetooth テストセットを通じ、特にハードウェア性能を担保する RF 試験のためのテスト環境を提供してきた。このたび、位置検出に利用する新規格である AoA(Angle of Arrival)/AoD(Angle of Departure)に対応するファームウェアを開発した。

1 まえがき

ヘッドフォンやスピーカ、スマートウォッチなどに代表される近距離ワイヤレスデバイスの多くが Bluetooth®テクノロジーを利用している。その適用範囲はデータ転送だけにとどまらず、距離検出や位置推定などにも展開されつつあり、1998 年の規格制定から 20 年あまり経過した今なお、利用分野は広がりを見せている。

Bluetooth テクノロジーの普及には適用範囲の拡張だけでなく、Bluetooth デバイスどうしの相互接続性を強力に担保する接続試験イベントや認証試験をベースとしたエコシステムが大きく貢献している。アンリツは 1999 年より Bluetooth SIG メンバーとして参加し、規格制定や相互接続試験に積極的に協力してきた。これらの活動を通して得た知見をベースに開発した MT8852B Bluetooth テストセット(以下、MT8852B)は、特にハードウェア性能を担保するための RF 試験に対するテスト環境に欠かせないツールとして、デバイス開発時の評価や製造の出荷検査で使われている。

MT8852B は Bluetooth デバイスに対する RF 試験に必要なデバイス制御を行う機能を有しており、本機単体で測定環境が完結できるようになっている。本稿では特に、Bluetooth の位置検出機能追加に追従した MT8852B の対応内容について紹介する。



図 1 MT8852B Bluetooth テストセット

2 Bluetooth Low Energy の進化

Bluetooth は電話用ヘッドセットなどを対象とする Basic Rate (1 Mbps)が規格化され、続いて音楽などより高速なデータレートを必要とするアプリケーションを対象とした高速化仕様 Enhanced Data Rate (EDR, 2 Mbps/3 Mbps)が策定された。その後、携帯電話や WLAN など主な無線システムが高速化を目指すなか、バッテリー駆動でも長時間使用できるシステム向けに考慮された仕様として Bluetooth Low Energy (1 Mbps)が誕生した。

2.1 Bluetooth Low Energy とは

Bluetooth Low Energy は、Basic Rate, EDR と比較して仕様を簡素化し、また通信タイミングを柔軟に制御できる仕組みを採用することで省電力化を図っている。これにより、たとえばコイン電池のみで年単位で稼働する温度センサーなどのリモートデバイスに利用できる。また同時接続数の実用限界数が高く、多重デバイスを組み合わせることによるメッシュネットワーク構築でも採用されている。

2.2 PHY 層から見る Bluetooth Low Energy 進化

Bluetooth Low Energy の PHY 仕様は Basic Rate と同じ GFSK(Gaussian FSK)を変調方式として採用している。PHY 層に依存する機能拡張は、ハードウェア変更を最小化しつつ実現できることを主眼に進められている。表 1 に Bluetooth Low Energy PHY 種別と対応規格を示す。

表 1 各 Bluetooth Core Specification による PHY 追加

Core Spec.	PHY	特長
~4.2	LE 1M (BLE)	データ長可変
5.0	LE 2M (2LE) LE coded (BLR)	伝送高速化 長距離通信
5.1	Constant Tone Extension (AoA/AoD)	方向探索

Low Energy は種別ごとに異なる PHY 層パケットフォーマットを有している。図 2 に各種別に対するパケットフォーマットを示す。

BLE (1 Mbps)

Preamble (1 octets)	Access-address (4 octets)	PDU (2-258 octets)	CRC (3 octets)
------------------------	------------------------------	-----------------------	-------------------

2LE (2 Mbps)

Preamble (2 octets)	Access-address (4 octets)	PDU (2-258 octets)	CRC (3 octets)
------------------------	------------------------------	-----------------------	-------------------

LE coded (1 bps)

← S=8 coding		→← S=2 or 8 coding →				
Preamble (80 us)	Access address	CI	TERM1	PDU	CRC	TERM2

BLE with constant tone extension (1 Mbps)

Preamble (1 octets)	Access address (4 octets)	PDU (2-258 octets)	CRC (3 octets)	Constant Tone Extension (16 to 160 μs)
------------------------	---------------------------------	-----------------------	-------------------	--

2LE with constant tone extension (2 Mbps)

Preamble (2 octets)	Access address (4 octets)	PDU (2-258 octets)	CRC (3 octets)	Constant Tone Extension (16 to 160 μs)
------------------------	---------------------------------	-----------------------	-------------------	--

図 2 Low Energy PHY 層パケットフォーマット

2LE は、Preamble を除く BLE のパケットフォーマットをそのまま踏襲しながら伝送レートを 1 Mbps から 2 Mbps に高速化している。なお Preamble 長は種別判断を容易にするため、時間長が同一になるように割り当てビット数が 2 倍(2 octets)になっている。

LE coded は、Preamble を除くデータに 2 倍長ないし 8 倍長となる符号化を行い、符号化利得により長距離伝送を実現している。Preamble 部分は低レベルでも同期性能を維持できるよう、BLE に対して 10 倍長になっている。

方向検出(Direction Finding)のための拡張は、BLE および 2LE の通常パケットの末尾に Constant Tone Extension と呼ぶ連続信号(ビット 1 を連続送信することによる無変調信号。搬送波周波数に対して+1 MHz)を付加している(図 3)。

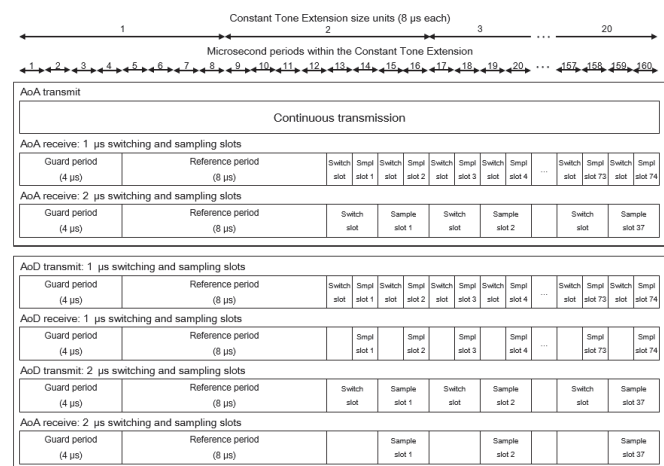


図 3 Constant Tone Extension 構造

2.3 方向検出(Direction Finding)

Bluetooth による方向検出は、送受どちらか一方が複数アンテナ、もう一方が単一アンテナを有する形で実現される。

複数アンテナを持つ側は、Constant Tone Extension 送信(受信)の際にアンテナを時分割で切り替える仕組みを備えている。アンテナ切替は所定の時間間隔、アンテナ順序で行われる(図 6, 7)。

単一アンテナを有する側は従来の PHY 層をそのまま利用する。複数アンテナからの信号を受信する場合も従来のハードウェアが利用でき、コストを抑えることができる。

また複数の個所で方向検出を行うことで、屋内などにおける位置検出を実現できる。

2.3.1 Direction Finding の仕組み

方向検出はアンテナ間距離差を位相差として検出することにより実現している。2 アンテナモデルにおける無線信号の到来方向、もしくは送信方向の検出原理を図 4 および図 5 に示す。

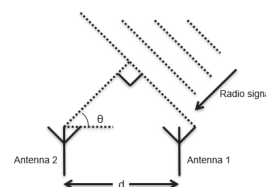


図 4 到来方向の検出

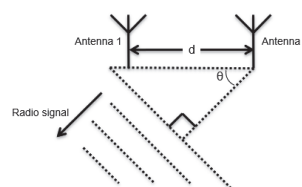


図 5 送信方向の検出

単一アンテナから送信される信号を複数アンテナで受信する場合、到来方向に準じた距離差が複数アンテナ間に生じる(図 4)。到来方向に呼応する角度を θ 、またアンテナ間距離を d とすると、アンテナ間に生じる距離差 $d \cos(\theta)$ により生まれる位相差 ϕ

$$\phi = 2\pi d \cos(\theta) / \lambda$$

が生じることになる。このとき λ は信号波長を表す。受信側は ϕ を検出することにより、角度 θ を

$$\theta = \arccos((\phi \lambda) / (2\pi d))$$

と計算することで到来方向を求めることが可能となる。

また複数アンテナから送信される信号を単一信号で受信する場合、送信アンテナ間に送信方向に呼応した距離差が生じる(図 5)。受信側でアンテナ間位相差を検出することにより、送信方向を検出することが可能となる。

2.3.2 AoA (Angle of Arrival)

到来方向の検出には、図 6 のように単一アンテナで送信した信号の Constant Tone Extension 部分を複数アンテナで時分割に受信し、アンテナ間位相差を検出することにより到来方向検出を実現する。各アンテナ間の位相差に加え、受信側がアンテナの位置関係、切替間隔を既知情報として利用することで到来方向が求められる。

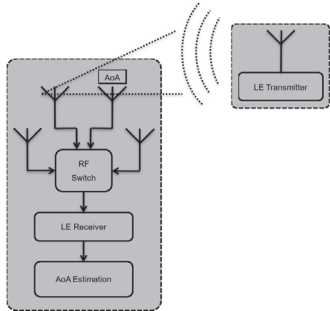


図 6 到来方向の検出(AoA)

2.3.3 AoD (Angle of Departure)

送信方向を検出する場合、図 7 のように複数アンテナより時分割で送信した信号の Constant Tone Extension 部分を単一アンテナで受信し、アンテナ間位相差を検出することにより方向検出を実現する。このとき、送信側はあらかじめ決められた時間間隔、アンテナ順で信号を送信するため、受信側ではパケット先頭からの時間をもとにして、どの個所がどのアンテナからの受信信号であるかを識別できる。アンテナの位置関係および送信順を知っている側（このとき、送信側、受信側どちらでも構わない）が分別した位相情報をもとに、AoA 時と同様にアンテナ間位相差から送信方向検出を実現する。

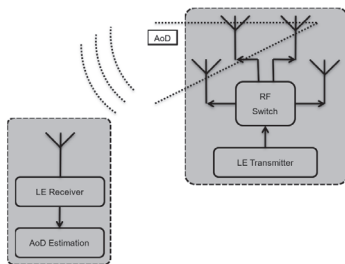


図 7 送信方向の検出(AoD)

3 AoA/AoD 向け PHY テストケース

AoA, AoD どちらの場合も、Constant Tone Extension に対する送信特性および受信特性により精度に影響を受ける。位相差検出精度品質を一定レベルに保つことを目的とした AoA, AoD 構成における RF テストケースが Bluetooth RF テスト規格として新たに設けられている。新規追加されたテストケースを表 2 に示す。

表 2 AoA/AoD 向け RF テスト項目(RF-PHY.TS.p15)

Test case #	Test case name
RF-PHY/TRM/ BV-15-C	Output power, With Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/ BV-16-C	Carrier frequency offset and drift, uncoded data at 1 Ms/s, Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/ BV-17-C	Carrier frequency offset and drift at 2 Ms/s, Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/ PS/BV-01-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ PS/BV-02-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ PS/BV-03-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ PS/BV-04-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ ASI/BV-05-C	Antenna switching integrity, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ ASI/BV-06-C	Antenna switching integrity, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ ASI/BV-07-C	Antenna switching integrity, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/ ASI/BV-08-C	Antenna switching integrity, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/RCV/ IQC/BV-01-C ~ BV-06-C	IQ Samples Coherency
RF-PHY/RCV/ IQDR/BV-07-C ~ BV-12-C	IQ Samples Dynamic Range

4 機能

MT8852B で新たに対応した AoA/AoD 向け RF テストケースを紹介する。

4.1 Output Power

Constant Tone Extension 送信におけるレベル変動は位相検出の精度に影響を与えることになる。本測定では Constant Tone Extension 部分を測定対象範囲に含める形で従来の Output Power 測定と同じ平均電力とピーク電力を評価する。実際の測定画面例を図 8 に示す。AoA 向け送信デバイスを対象とする。



図 8 Output Power 測定画面



図 11 Carrier frequency offset and drift 測定画面

4.2 Carrier frequency offset and drift

アンテナ距離差に呼応する位相差検出では、アレイアンテナのような同時受信の形とは異なりアンテナ切替による時間分割信号を利用する。このため位相差検出を精度よく行うためには Constant Tone Extension 伝送部分が規定周波数どおりであり、かつ周波数変動幅が抑えられていることが求められる。

従来の Carrier frequency offset and drift では Preamble を基準とする周波数オフセット、および時間変動に伴う周波数ドリフトを測定するのに対し、本測定では Constant Tone Extension が測定対象となる。AoA 向け送信デバイスを対象とする。

測定は Preamble および Payload 末尾の所定 16 μ s における平均周波数 f_0 , f_p (図 9), また Constant Tone Extension における 16 μ s ごとの周波数平均 f_{maxi} を計測することにより行われる (図 10)。さらに Payload における絶対周波数偏移平均値 Δf_{1avg} を基準として $f_{si}(=f_{3maxi} - \Delta f_{1avg})$ を算出し、それぞれの値が

$$f_{TX} - 150 \text{ kHz} \leq f_{si} \leq f_{TX} + 150 \text{ kHz} \quad *f_{TX} \text{ は公称周波数}$$

$$|f_{s1} - f_p| \leq 19.2 \text{ kHz (BLE) or } 13.6 \text{ kHz (2LE)}$$

$$|f_{si} - f_0| \leq 50 \text{ kHz}$$

$$|f_{si} - f_{si-3}| \leq 19.2 \text{ kHz}$$

を満足するかどうかを評価する。実際の測定画面例を図 11 に示す。

MT8852B では通常の Carrier frequency offset and drift と同様にシンボルタイミングを厳密に検出することによる各周波数の測定位置決めを実施し、規格準拠する測定を実現している。

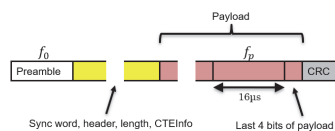


図 9 Constant Tone Extension 周波数基準(f_0 , f_p)

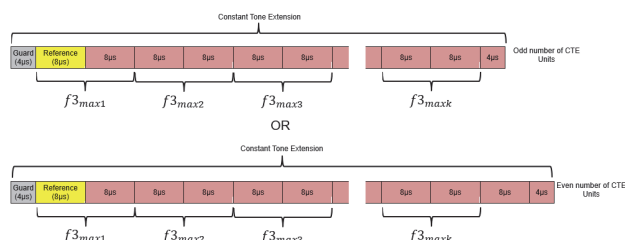


図 10 Constant Tone Extension の周波数ドリフト

4.3 Tx Power Stability

AoD 向け送信ではアンテナ切替による時分割送信を行うことから、アンテナ切替タイミングやスイッチング応答特性が位相差検出に影響する。そのため各アンテナに割り当てられた送信期間内に Constant Tone Extension が一定レベルで安定送信されることが求められる。またアンテナ間のレベル変動が小さいことも重要になる。

アンテナ切替タイミングについて、Constant Tone Extension は図 3 のように Reference period, Switch slot, および Sample slot と呼ばれる区間が設定され、Switch slot 区間の範囲内でアンテナ切り替えが実行されることが要求される。もし Switch slot 区間を超えてアンテナ切り替えが行われた場合、Reference period, Sample slot 区間は影響を受けることになる。

Tx Power Stability では Reference period 区間に対する平均電力 $P_{REF,AVE}$ と最大変動幅 $P_{REF,DEV}$ の比、また各 slot 期間に対する Reference period と Sample slot の平均電力 $P_{n,AVE}$ と最大変動幅 $P_{n,DEV}$ を測定し (n は各 slot に対する番号)、これらが

$$P_{REF,DEV} / P_{REF,AVE} < 0.25$$

$$P_{n,DEV} / P_{n,AVE} < 0.25$$

を満足するかどうかで評価する。実際の測定画面を図 12, 図 13 に示す。

MT8852B では各種電力測定を行う際、Carrier frequency offset and drift 測定と同様にシンボルタイミングを基準にして各測定区間の正確な位置決めを行い、規格に準拠する測定を実現している。また図 12 のように Sample slot に対する $P_{n,DEV}/P_{n,AVE}$ 結果のワーストケース値を代表値として表示することで、全 Sample slot が規格を満たしているかどうかを一目で把握できるようにしている。



図 12 Tx Power Stability 測定画面 (Reference period, Slot 代表値)

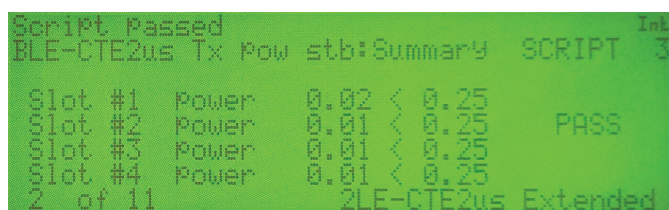


図 13 Tx Power Stability 測定画面 (各 Slot)

4.4 BLE packet generator の拡張

MT8852B では、任意の Low Energy 信号出力を利用したい場合のために BLE packet generator 機能を用意している。この機能を拡張し、AoA/AoD に対応する信号出力に対応する。設定画面を図 14 に示す。

Constant Tone Extension 種別や時間長を任意に切り替えられる設定項目を用意することで、RF テスト規格としては規定されていない AoA, AoD における感度試験など、ユーザが希望する測定条件での評価に利用することができる。

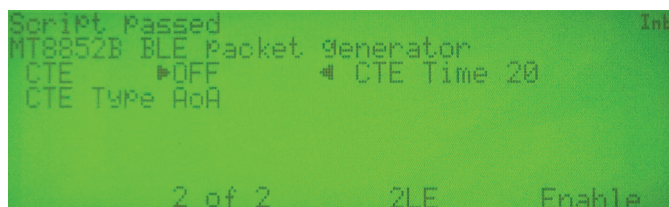


図 14 BLE packet generator 設定画面 (CTE 関連設定)

5 むすび

本稿では、Bluetooth Low Energy の機能拡張の一つである方向検出(Direction Finding)を紹介しながら MT8852B における取り組みについて紹介した。

アンリツは今後も Bluetooth SIG メンバーとして規格策定などをサポートを通じた Bluetooth テクノロジーの発展に貢献するとともに、ユーザの疑問や問題を解決するよりよい測定ソリューション提供を推進していく。

参考文献

- 1) Bluetooth Core Specification revision v5.2 (2019-12)
- 2) Bluetooth Radio Frequency (RF) / Bluetooth® Test Suite revision RF.TS.p30 edition 2 (2020-1)
- 3) Bluetooth Radio Frequency Physical Layer (RF PHY) / Bluetooth® Test Suite revision RF-PHY.TS.p15 (2020-1)
- 3) Bluetooth Core Specificaion Version 5.2 Feature Overview version 1.0 (2020-01)

執筆者



後 藤 剛 秀
通信計測カンパニー
IoT テストソリューション事業部
商品開発部



熊 木 成 央
通信計測カンパニー
IoT テストソリューション事業部
商品開発部



中 野 隆 史
通信計測カンパニー
エンジニアリング本部
技術部

表 3 MT8852B サポートテストケース

Basic Rate (RF.TS.p30 に準拠)	
RF/TRM/CA/BV-01-C	Output Power
RF/TRM/CA/BV-03-C	Power Control
RF/TRM/CA/BV-07-C	Modulation Characteristics
RF/TRM/CA/BV-08-C	Initial Carrier Frequency Tolerance
RF/TRM/CA/BV-09-C	Carrier Frequency Drift
RF/TRM/CA/BV-14-C	Enhanced Power Control
RF/RCV/CA/BV-01-C	Sensitivity – single slot packets
RF/RCV/CA/BV-02-C	Sensitivity – multi-slot packets
RF/RCV/CA/BV-06-C	Maximum Input Level
Enhanced Data Rate (EDR) (RF.TS.p30 に準拠)	
RF/TRM/CA/BV-10-C	EDR Relative Transmit Power
RF/TRM/CA/BV-11-C	EDR Carrier Frequency Stability and Modulation Accuracy
RF/TRM/CA/BV-12-C	EDR Differential Phase Encoding
RF/TRM/CA/BV-15-C	EDR Guard Time
RF/TRM/CA/BV-16-C	EDR Synchronization Sequence and Trailer
RF/RCV/CA/BV-07-C	EDR Sensitivity
RF/RCV/CA/BV-08-C	EDR BER Floor Performance
RF/RCV/CA/BV-10-C	EDR Maximum Input Level
Bluetooth Low Energy (RF-PHY.TS.p15 に準拠)	
RF-PHY/TRM/BV-01-C	Output power
RF-PHY/TRM/BV-05-C	Modulation Characteristics, uncoded data at 1 Ms/s
RF-PHY/TRM/BV-06-C	Carrier frequency offset and drift, uncoded data at 1 Ms/s
RF-PHY/TRM/BV-10-C	Modulation Characteristics at 2 Ms/s
RF-PHY/TRM/BV-12-C	Carrier frequency offset and drift at 2 Ms/s
RF-PHY/TRM/BV-13-C	Modulation Characteristics, LE Coded (S=8)
RF-PHY/TRM/BV-14-C	Carrier frequency offset and drift, LE Coded (S=8)
RF-PHY/TRM/BV-15-C	Output power, With Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/BV-16-C	Carrier frequency offset and drift, uncoded data at 1 Ms/s, Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/BV-17-C	Carrier frequency offset and drift at 2 Ms/s, Constant Tone Extension
RF-PHY/TRM/PS/BV-01-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/PS/BV-02-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 1 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/PS/BV-03-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 2 μ s Switching Slot
RF-PHY/TRM/PS/BV-04-C	Tx Power Stability, AoD Transmitter at 2 Ms/s with 1 μ s Switching Slot
RF-PHY/RCV/BV-01-C	Receiver sensitivity, uncoded data at 1 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-06-C	Maximum input signal level, uncoded data at 1 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-07-C	PER Report Integrity, uncoded data at 1 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-08-C	Receiver sensitivity at 2 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-12-C	Maximum input signal level at 2 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-13-C	PER Report Integrity at 2 Ms/s
RF-PHY/RCV/BV-26-C	Receiver sensitivity, LE Coded (S=2)
RF-PHY/RCV/BV-27-C	Receiver sensitivity, LE Coded (S=8)
RF-PHY/RCV/BV-30-C	PER Report Integrity, LE Coded (S=2)
RF-PHY/RCV/BV-31-C	PER Report Integrity, LE Coded (S=8)

公知